ChinaXiv合作期刊

中国西北地区太阳辐射时空分异特征

姚玉璧[1,2]， 郑绍忠[1]， 董宏昌[3]， 石 界[3]， 张 民[1]， 夏 权[1]

（1. 兰州资源环境职业技术大学，黄河流域生态环境产教融合研究院，甘肃省气候资源利用与防灾减灾重点实验室，甘肃 兰州 730021；2. 中国气象局兰州干旱气象研究所，甘肃 兰州 730020；3. 甘肃省定西市气象局，甘肃 定西 743000）

摘 要：应用近60 a中国西北169个国家基本气象站气象观测资料，对中国西北总辐射的时域变化、空间分布和次区域时空演变特征进行了研究。结果表明：(1) 青海西北部的柴达木盆地和甘肃西部为太阳能资源最丰富区，陕西南部和甘肃东南部的较小区域为资源丰富区，其余大面积区域均为资源很丰富区。(2) 1961—2020年除新疆西南部、甘肃和新疆接壤区、甘肃北部和陕西北部的小范围区域总辐射呈上升趋势外，西北大部分区域总辐射呈下降趋势。(3) EOF第一模态特征向量场表明，总辐射振荡强度由西向东加强，各分量高载荷区主要集中于中东部，该区域是总辐射易出现异常、振荡强且敏感的地区。(4) EOF第二模态特征向量场自西向东呈双偶极子型；青海全境和甘肃大部为正值区域，也是总辐射异常振荡最强的区域。(5) 依据REOF特征向量不同模态空间分异结构类型，可将研究区域划分为主要受东亚季风影响的"西北东部异常型"、主要受东亚季风影响边缘区的"西北中部异常型"和主要受西风带影响的"西北西部异常型"等3个次区域。3个次区域总辐射减少的突变点分别出现在1973年、2017年和2008年。

关键词：总辐射；空间异常分型；次区域变化；中国西北

工业革命以来，石化能源在推动工业化进程的同时，带来了严重的环境污染和气候变化问题，环境污染和全球气候变暖已经危及到人类的生存安全。改善能源结构，发展清洁能源，实现节能减排，是人类解决能源问题，走可持续发展的必由之路。太阳能资源因其庞大的能量储备、广阔的空间分布、洁净无污染等优点，已成为学界公认的最具优势的新能源之一，因此，研究太阳能资源时空分布特征，为开发利用提供科学基础，具有非常重要学术价值和现实的意义[1-2]。

联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第六次评估报告（AR6），通过更有力的证据进一步确证了近百年来全球气候变暖的客观事实。近百年气候系统正在发生广泛而迅速的变化，人类活动已经使得大气、陆地和海洋变暖，人类活动对气候变暖影响的信号更为清晰[3]。气候变化必然导致大气的物理和化学结构改变，进而改变太阳辐射传输[4]。太阳总辐射与地理参数有关的同时，还受云量、气温、大气消光系数、大气的水汽含量、臭氧含量和大气气溶胶等多种因素的影响。全球平均地表温度升高后，会引起气候状态量如大气水汽含量、云量等的变化，进而影响到辐射过程[5]。同时，工业化进程也使得城市空气污染问题突出，雾、霾等天气多发，大气气溶胶增加，垂直能见度下降，影响到达地面的太阳总辐射[6-7]。因此，在全球气候变化背景下太阳总辐射时空演变的研究是学术界关注的热点科学问题。

近年来，中国学者利用常规观测资料估算逐日直接辐射的方法，开展了全国太阳能时空变化特征和资源开发利用潜力评估研究。1981—2014年中国太阳总辐射大部分区域呈下降趋势，其中，华北、

收稿日期：2022-08-19； **修订日期：**2023-02-21
基金项目：甘肃省高等学校产业支撑计划项目"一带一路"太阳能高辐射区光能开发潜力与利用效率评估研究及应用（2020C-34）；甘肃省自然科学基金（21JR7RA772）；兰州资源环境职业技术大学重大科技项目（XJZD2023-03）
作者简介：姚玉璧（1962-），男，研究员级高级工程师，主要从事气候变化对农业与生态的影响研究. E-mail: yaoyubi@163.com
通讯作者：董宏昌. E-mail: dsg327@163.com

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

东北和西南区域呈显著下降；华南区呈波动变化，趋势特征不明显；西北区域则呈明显增加趋势。太阳总辐射的季节变化呈明显时空分异特征[8-11]。基于极端梯度提升(XGBoost)方法对中国北方沙区太阳总辐射量进行估算，1990—2019年太阳总辐射呈减少趋势，递减率为8.66 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$[12]。华南太阳能资源方面，海南的可利用价值最高，广东其次，广西最低[13]。中国西北地区太阳能资源非常丰富，是太阳能辐射的高能区域[14-15]；稳定性方面甘肃省北部、青海省北部、新疆东北部和新、甘、青三省交界处是太阳能资源最稳定的区域，内蒙古西部区域太阳能资源丰富且较为稳定。陕西的中部及南部、新疆乌鲁木齐周边地区则是中国西北地区太阳能资源不稳定的区域[16-21]。

1961—2000年黄河流域近年来太阳总辐射呈下降趋势，在季节上主要表现在夏季和冬季[22]。1961—2017年河套平原地面接收太阳辐射年平均值为6030.83 MJ·m^{-2}，以0.3 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$的速率呈缓慢减少趋势。河套平原年太阳辐射量振荡主周期为24 a[23]。1961—2009年中国东中部地区地面太阳辐射比西部地区下降显著[24]。

在气候变暖背景下，近60 a来西北地区太阳能资源如何变化？其分异特征如何？有待更深入地研究。为此，分析西北地区太阳总辐射时空变化特征，揭示气候变化背景下总辐射变化规律，研究其异常分布规律、次区域变化机制，为中国西北太阳能资源开发利用提供理论基础，为如期实现“碳中和”目标提供科学依据。

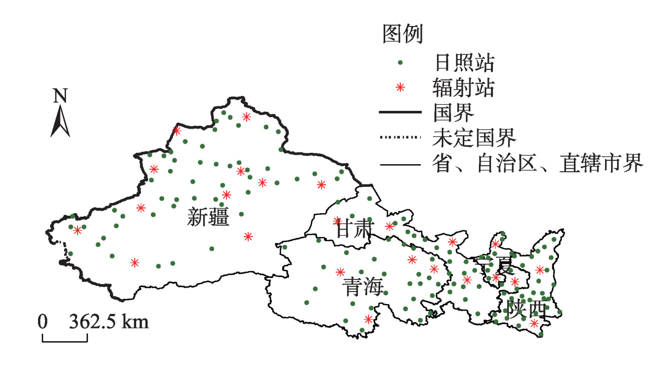
1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

中国西北地区是西风带、高原季风和东亚夏季风边缘的交汇地带，自西向东由新疆维吾尔自治区、青海省、甘肃省、宁夏回族自治区和陕西省等5省区组成，国土面积约为3.1×10^{6} km^{2}，地理位置为73°40′~111°15′E，31°36′~48°10′N之间，该区域远离海洋，深居内陆，大部分区域属干旱、半干旱气候区，具有降水少且分布不均，植被覆盖度较低，水资源短缺，地表干燥等特点。虽然70%以上地区降水不足400 mm；但太阳能资源十分丰富，在5852~6690 MJ·m^{-2}[25]。

1.2　研究数据

研究资料来源于中国西北地区5省区国家基本气象站，气象站点选择时首先考虑空间区域具有代表性的气象观测站点，其次，考虑站点分布均匀且年代连续一致。选取169个气象台站在1961—2020年的逐日地面气象观测基本要素资料为研究数据(图1)。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2021)5448号，对底图边界无修改。下同。

图1　研究区站点分布示意图

Fig. 1　Distribution of stations in the study area

1.3　计算方法

1.3.1　月太阳总辐射量的计算　本文采用国家标准——《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526-2019)，计算和评估到达地面的太阳总辐射量[26]。得到169个台站的月太阳总辐射值。公式如下：

$$Q = Q_0(a + bS) \tag{1}$$

$$S = n/N \tag{2}$$

式中：Q为月太阳总辐射量(MJ·m^{-2})；Q_0为月天文太阳总辐射(MJ·m^{-2})，即大气层顶接收到的太阳辐射，是纬度和季节的函数，通过理论计算即可确定；n为日照时数(h)；N为可照时数(h)；S为月日照百分率，其变化受到海拔高度、云量、水汽、大气成分和气溶胶等的影响；a、b为经验系数。

利用西北区域24个辐射观测站(图1)历年各月总辐射与月日照时数资料，采用最小二乘法拟合计算出各站各月的经验系数a、b，分别建立各辐射站逐月太阳总辐射计算式。其余站a、b用逆距离加权插值法(IDW)内插确定其1—12月a、b值系数，再计算各站逐月总辐射。

1.3.2　数据分析方法　气候要素的时间趋势变化应用一元线性函数拟合[27]：

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

$$X_i = at_i + b, i = 1,2,\cdots, n \quad (3)$$

式中:X_i为气象要素;t_i为气象要素对应的时间;a,b为回归系数;n为样本长度。

周期振荡特征分析采用小波方法,小波基(母波)有多种,采用有边界Morlet小波能量谱方法分析;时间序列变化突变检测分析采用M-K(Mann-Kendall)方法,该方法是非参数统计检验突变的方法[28-29]。

气象要素时空异常特征分析采用经验正交函数(EOF)、旋转经验正交函数(REOF)方法[28],并根据特征值误差范围进行显著性检验[30]。

1.3.3 空间分布表达方法　太阳总辐射及其特征向量的空间分布采用ArcGIS软件绘图,插值采用普通克里金插值(Ordinary Kriging,OK)方法表达。

2 结果与分析

2.1 总辐射时空分布

1961—2020年近60 a中国西北年平均总辐射在4518.9~6689.0 MJ·m^{-2},总辐射分布呈西北中部向西部和东部逐步减少的特征,高值区为青海西北部的柴达木盆地和甘肃西部,最大值出现在青海冷湖,年平均总辐射6689.0 MJ·m^{-2};总辐射低值区在陕西南部和甘肃东南部,最小值出现在陕西镇巴,年平均总辐射4518.9 MJ·m^{-2};其余地区介于其间(图2a)。1991—2020年近30 a中国西北总辐射气候平均值为5771.4 MJ·m^{-2},总辐射气候平均最大值6564.0 MJ·m^{-2},也出现在青海冷湖;气候平均最小值4538.0 MJ·m^{-2},仍出现在陕西镇巴,其余各地在4538.0~6564.0 MJ·m^{-2}(图2b)。

中国西北年平均总辐射1961—2020年近60 a与1991—2020年近30 a分布特征进行比较,辐射高值区范围明显缩小,而低值区范围变化不大。

依据《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526-2019)[26]评估标准,将年太阳总辐射分为4类。其阈值为:QY≥6300 MJ·m^{-2},为资源最丰富;5040 MJ·m^{-2}≤QY<6300 MJ·m^{-2},为资源很丰富;3780 MJ·m^{-2}≤QY<5040 MJ·m^{-2},为资源丰富;QY<3780 MJ·m^{-2},为资源一般。

分别以1961—2020年60 a和1991—2020年30 a为评估时段,由图2可知,甘肃西部和青海西北部的柴达木盆地为资源最丰富区;除陕西南部小部分区域外,其余区域均为资源很丰富区;无资源一般区域。其中资源最丰富区域略小,资源很丰富区域扩大,资源丰富区基本稳定。由此可知,中国西北除极小区域外,绝大部分地区为太阳能资源很丰富区及以上区域。

年总辐射时间序列趋势系数在新疆西南部、甘肃和新疆接壤区、甘肃北部、陕西北部和南部的小范围区域总辐射趋势系数为正值,其余大部分区域总辐射趋势系数为负值,说明总辐射呈下降趋势,且大多数台站总辐射趋势系数r≤-0.26(P≤0.05),通过α=0.05的显著性检验。总辐射趋势倾向率负值绝对值最大为-106.52 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$,出现在陕西省武功县,大部分区域在-106.52~-0.001 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$之间,总辐射趋势倾向率为正值的范围较小。倾向率正值最大为100.42 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$,出现在新疆皮山县(图3)。

2.2 总辐射异常特征

为了进一步厘清中国西北区域总辐射的时空异常特征,对总辐射进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分解分析和旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)分解分析。

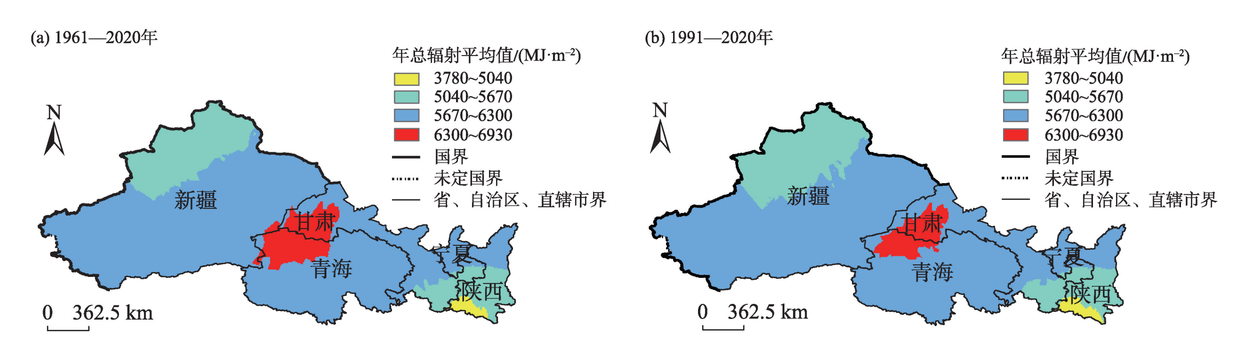


图2　中国西北地区年平均总辐射空间分布

Fig. 2　The chart of spatial distribution of total radiation on Northwest in China

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

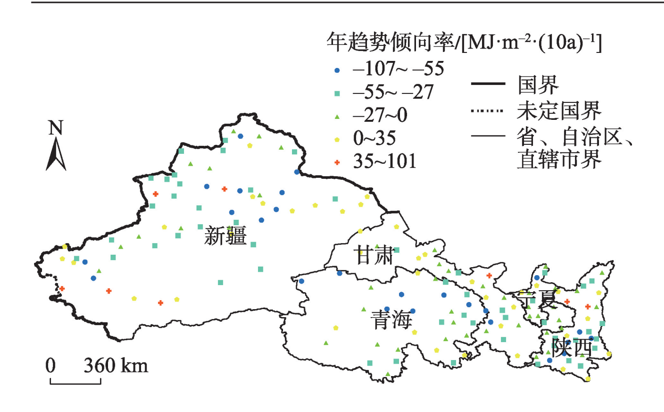


图3 西北地区总辐射趋势倾向率空间分布

Fig. 3 The chart of total radiation tendency rate on Northwest in China

2.2.1 特征向量场的方差贡献率 年总辐射EOF分析中，求得总辐射前10项模态特征值方差占总方差的比率（表1），其前10项模态特征值方差占总方差的合计比率为72.18%。表明总辐射前10项模态特征向量场能够解释整体要素场的结构和空间分异特征。进一步对总辐射EOF前10项模态特征向量进行REOF分析，求得REOF分析特征向量场，其REOF分解后总辐射前10项模态特征值方差占总方差比率的合计仍为72.18%。

从总辐射EOF分解各模态特征值方差的占比分布可见，前3项模态特征值方差的占比高于其后7项，其值高出约一个数量级，随着模态项数目的递增，特征值方差的占比呈递减趋势，且递减率的收敛速度逐渐降低。表明西北区域地理范围辽阔，影响太阳辐射的地形、地貌和气候因子差异较大，总辐射变率结构和空间差异性显著。

EOF分析分解得到的特征向量场，其特征向量的方差的占比集中到前几项主分量上，因此特征值的方差占比分布有明显差异，靠前的几项模态特征值的方差占比明显偏大；而REOF分析，既可以较好的表达次区域要素变率结构，还可分析次区域之间的相关性特征，故旋转后各模态特征值的方差占比分布值区域接近，较EOF显得更均匀、更分散，且各模态特征值的方差占比的大小顺序也有变化。

2.2.2 EOF特征向量场结构及时间系数 EOF分析前2项第一模态和第二模态的特征向量场的特征值方差占比分别为21.47%、11.37%。采用North等[30]提出的检验方法对特征值进行显著性检验，通过了显著性检验，表明其特征向量场是主成分分量，是最为重要的空间异常模态，可以反映中国西北地区总辐射变率结构和空间差异，其空间分布结构能够代表西北总辐射变量场的典型分布型。

总辐射EOF第一模态特征向量场空间分布表明（图4a），总辐射特征向量分量除新疆西南部的个别区域为负值外，其余区域均为正值，大部分区域各分量值在0.01~0.13之间。大部分区域分量均为正值，反映出西北大部分区域总辐射振荡位相相同、空间趋势一致的特征，振荡的同位相特征表明，中国西北主要受西风带系统影响，大部分区域大部分时段受同一大尺度天气系统所控制，因而，总辐射空间分布趋于一致。总辐射振荡强度由西北向东南加强；其特征向量值≥0.08的区域出现在西北地区中东部，最大中心出现在甘肃的山丹(38.8°N，101.1°E)，特征向量值为0.13，说明此处为该空间分异类型中总辐射变化幅度最大、最敏感的地区，也是总辐射振荡最强的区域。

EOF第一模态的时间系数倾向率为-1.99·$(10a)^{-1}$（R^2=0.3278，$P\leq 0.01$）（图略），第一模态的特征向量场对应时间系数呈显著下降趋势，反映西北大部分区域总辐射呈减少趋势。

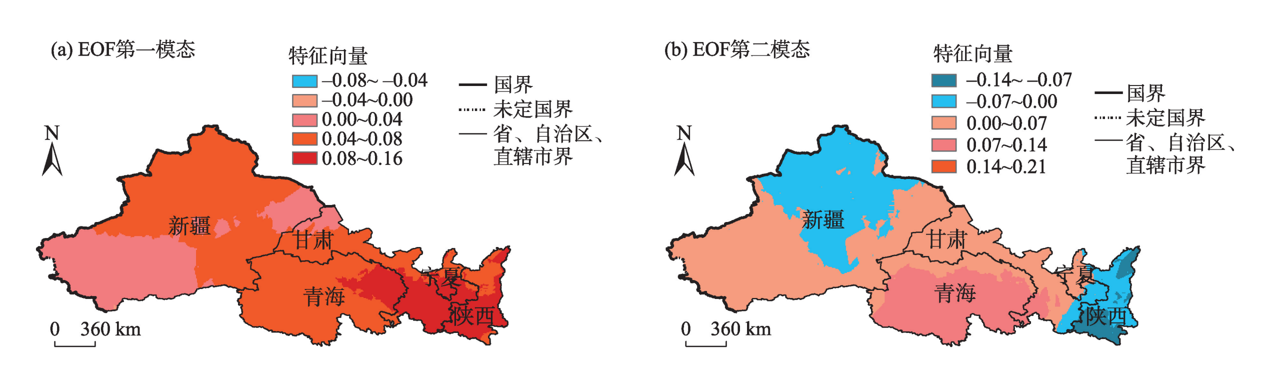


图4 EOF特征向量场前2个模态的空间分布

Fig. 4 The chart of spatial distribution of the first two main modes for EOF eigenvector

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

EOF第二模态特征向量场在新疆呈西南到东北“+、-”偶极子型分布；在甘、青、宁和陕西由东到西也呈“+、-”偶极子型分布；西北地区由西到东的纬向型“+、-”，“+、-”偶极子型特征(图4b)，新疆西南部、青海全境和甘肃大部为正值区域，最大值为0.16，出现在青海省达日(33.8°N，99.7°E)、贵南(35.6°N，100.7°E)；新疆中北部、陕西为负值区域，负值绝对值最大为-0.14，出现在陕西镇巴(32.5°N，107.9°E)。

2.2.3 REOF特征向量场变率结构及空间分异　西北地区总辐射旋转后特征向量场前3项模态特征值方差的占比分别为13.19%、12.36%、10.07%(表1)，REOF第一模态～第三模态特征向量特征值方差的占比合计值为35.62%，可见，旋转后前3个模态特征向量场是总辐射空间场最重要的3个空间分异结构模态，反映了西北总辐射的次区域空间分异特征，可按前3项模态特征向量场进行次区域空间区划分型。在次区域分型场中选取与次区域场时间系数(RPC)相关最高的站点为次区域代表站，分析其时间序列变化特征。

由总辐射REOF第一模态特征向量场可见(图5a)，总辐射中西部各分量值<0，北部及东南部各分量值>0，且各分量载荷绝对值东部大于西部，载荷向量绝对值最大区位于陕西省，表明总辐射在该空间结构中振荡幅度最大、最敏感区在陕西省，属于东亚季风控制区，区域划分为“西北东部异常型”。主要包括陕西省全部和甘肃省、宁夏东南部。与该次区域场时间系数(RPC)相关性最高的站点为陕西省留坝县(33.6°N，106.9°E)；REOF第一模态特征向量场时间系数的倾向率为-0.034·$(10a)^{-1}$(R^2=0.0034，$P>0.10$)，时间系数呈波动略下降趋势，但未通过信度检验(图略)。说明西北东部异常型强度略减。

总辐射特征向量旋转后REOF第二模态空间分布表明(图5b)，除个别站载荷向量分量值<0，以中

表1　EOF和REOF前10项模态特征值方差比率

Tab. 1　The percentage of contribution to whole variance of the first ten EOF and REOF eigenvector for total radiation

模态	第一	第二	第三	第四	第五	第六	第七	第八	第九	第十	合计方差比率/%
EOF方差比率/%	21.47	11.37	10.69	7.32	4.77	4.36	3.77	3.23	2.71	2.49	72.18
REOF方差比率/%	13.19	12.36	10.07	6.35	5.93	7.84	5.41	4.80	3.38	2.86	72.18

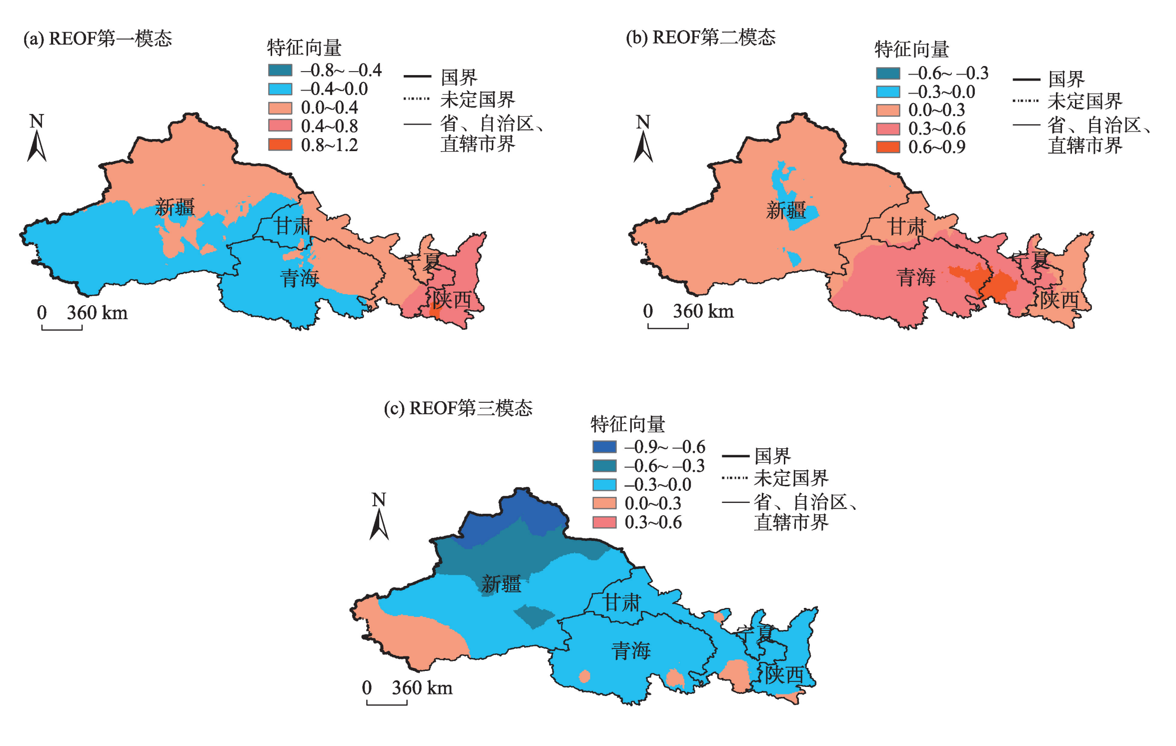


图5　REOF特征向量前3个主要模态的空间异常分型

Fig. 5　The spatial abnormity typing of the first four main modes for REOF eigenvector

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

部为主的大部分区域载荷向量分量值＞0；载荷向量高值区在甘肃河东及青海中部。该区域属于东亚季风边缘区，区域划分为“西北中部异常型”。包括青海省全部、甘肃省大部和新疆区东部南部。与该次区域场时间系数（RPC）相关性最高的站点为甘肃省岷县(34.4°N，104.0°E)；时间系数变化倾向率为−0.259·(10a)$^{-1}$（R^2=0.201，P≤0.01），故总辐射西北中部异常型特征也呈下降趋势。

总辐射特征向量旋转后REOF第三模态大部分区域的载荷向量分量值＜0（图5c）；载荷向量各分量在西北区域西北部的新疆出现高载荷绝对值集中，表明总辐射REOF第三模态空间结构中，总辐射振荡最大区、敏感区在新疆；该地区主要受西风带控制。区域划分为“西北西部异常型”。与该次区域场时间系数（RPC）相关性最高的站点为新疆五家渠市蔡家湖镇(44.2°N，87.5°E)；REOF第三模态时间系数呈极显著上升趋势。时间系数倾向率为0.257·(10a)$^{-1}$（R^2=0.199，P≤0.01）。

根据REOF第一模态～第三模态载荷向量场各分量的变率结构和空间分布，可将西北总辐射分布区进一步分为3个次区域，即“西北西部异常型”区域、“西北中部异常型”和“西北东部异常型”区域，各分区与该次区域场时间系数（RPC）相关性最高的站点分别为新疆五家渠市蔡家湖镇、甘肃省岷县、陕西省留坝县。

2.3 总辐射空间分异次区域变化特征

根据总辐射空间异常分型区划，选取与该次区域场时间系数（RPC）相关性最高的站点为代表站，其属于总辐射振荡幅度最大、变化敏感的站。该站总辐射变率结构基本能够反映该区域总辐射的变率结构,通过对各代表站变率结构分析，进一步了解其在时频域上整体特征和局部化信息结构变化。

2.3.1 次区域趋势变化 由表2可知，“西北东部异常型”区域代表站陕西省留坝县总辐射呈减少趋势，其变化倾向率为−25.335 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，趋势系数为r=−0.182，未通过显著性检验；表明“西北东部异常型”区域总辐射呈减少趋势，但不显著。“西北中部异常型”区域典型代表站甘肃省岷县总辐射呈极显著减少趋势，变化倾向率为33.831 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，趋势系数为r=−0.300，通过P≤0.01信度水平。“西北西部异常型”区域代表站新疆五家渠市蔡家湖镇总辐射也呈极显著减少趋势，变化倾向率为−45.090 MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$，趋势系数为r=−0.511，通过P≤0.01信度水平。

表2 总辐射空间异常分型次区域趋势系数和倾向率

Tab. 2 Trend coefficient and tendency rate of the subregional total radiation of spatial abnormity typing

典型站	总辐射趋势系数	总辐射倾向率/[MJ·m^{-2}·(10a)$^{-1}$]
留坝	−0.182	−25.335
岷县	−0.300*	−33.831*
蔡家湖	−0.511*	−0.300*

注：*表示P≤0.01。

2.3.2 次区域突变分析 本文应用曼−肯德尔（Mann-Kendall）突变分析，对次区域代表站的总辐射分析其是否存在突变。图6给出了总辐射次区域典型代表站M-K计算结果，其中UF由总辐射顺序时间序列的秩序列计算而得，UB由总辐射逆序时间序列的秩序列计算而得；设α=0.05，则$|U_\alpha|$=1.96。当$|UF|\geq|U_\alpha|$时，表明样本序列存在显著的增加或减少，同时，UF和UB曲线的交叉点即为突变的开始点。

“西北东部异常型”区域代表站为陕西省留坝县，其总辐射M-K检测顺序统计曲线UF从1961年开始总体呈下降趋势(图6a)，且于1983年通过显著性检验临界线U_α，说明UF显著下降，UF和UB线在临界线U_α之间相交时间为1973年。反映出“西北东部异常型”太阳总辐射呈减少趋势，其减少的突变点在1973年。

“西北中部异常型”区域代表站为甘肃省岷县，其总辐射顺序统计曲线UF从1972年开始波动下降(图6b)，从1988年超过临界线U_α，之后略有上升，2006年后又开始下降，从2019年再次超过临界线U_α。UF和UB线交叉于2017年。反映出“西北中部异常型”太阳总辐射也呈显著下降趋势，总辐射减少突变点在2017年。

“西北西部异常型”区域代表站新疆五家渠市蔡家湖镇，其总辐射M-K检测UF呈下降特征(图6c)，从1968年开始UF呈现持续下降，在2010年超过了临界线U_α，UF和UB线交叉于2008年。说明该异常型区域的太阳总辐射呈显著下降趋势，总辐射减少的突变点在2008年。

2.3.3 次区域周期特征 为了进一步揭示中国西北太阳能总辐射各空间分异类型在时频域上的周期特征,对西北总辐射进行小波分析，小波分析能反映信号时频域上整体特征、局部化信息结构、突变的

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

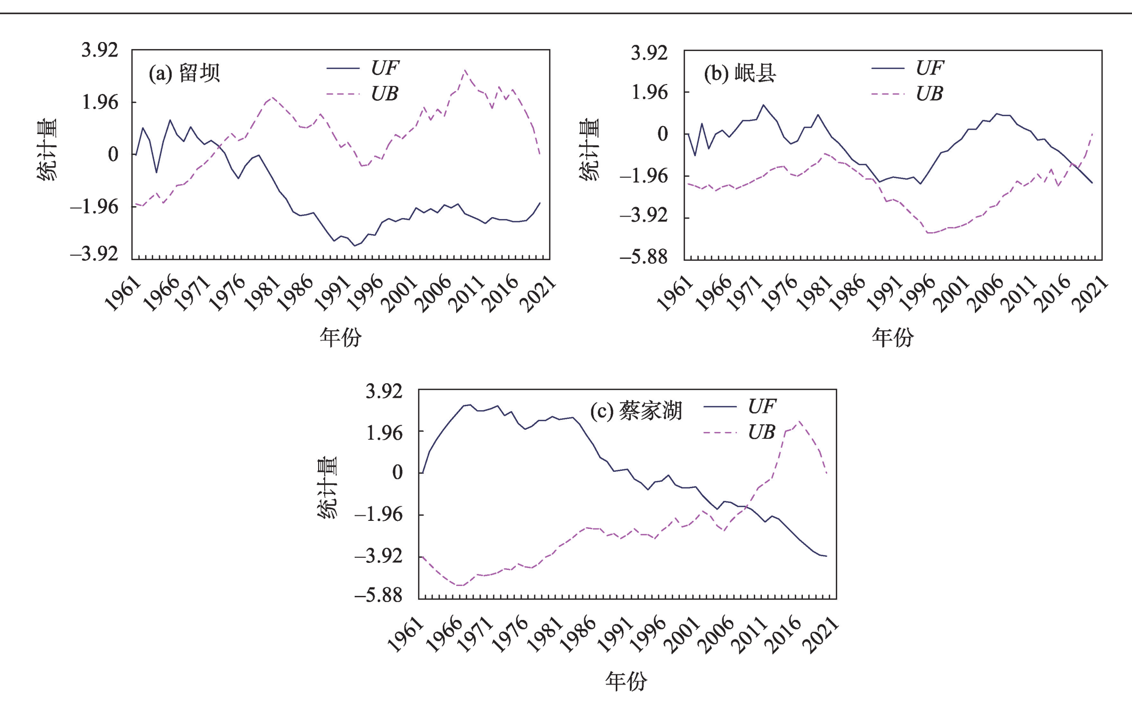


图6 总辐射空间异常分型次区域突变检验

Fig. 6 Suddenly check curve of the subregional total radiation of spatial abnormity typing

特征。因而能有效的从时频域上整体特征信息中提取局部化信息，进行伸缩、平移对信号进行多尺度细化。本文采用有界限Morlet小波能量谱分析方法，分析中国西北近60 a总辐射变率结构、空间分异在时域的振荡规律。

由图7可见，"西北东部异常型"区域代表站留坝县近60 a总辐射周期特征不显著。总辐射表现为4个高低交替：20世纪60—70年代总辐射偏高；80—90年代初总辐射偏低；90年代后期到21世纪初总辐射偏高，之后偏低。

"西北中部异常型"代表站岷县近60 a总辐射有显著的2~3 a周期振荡特征(图6b)，该周期在1960—

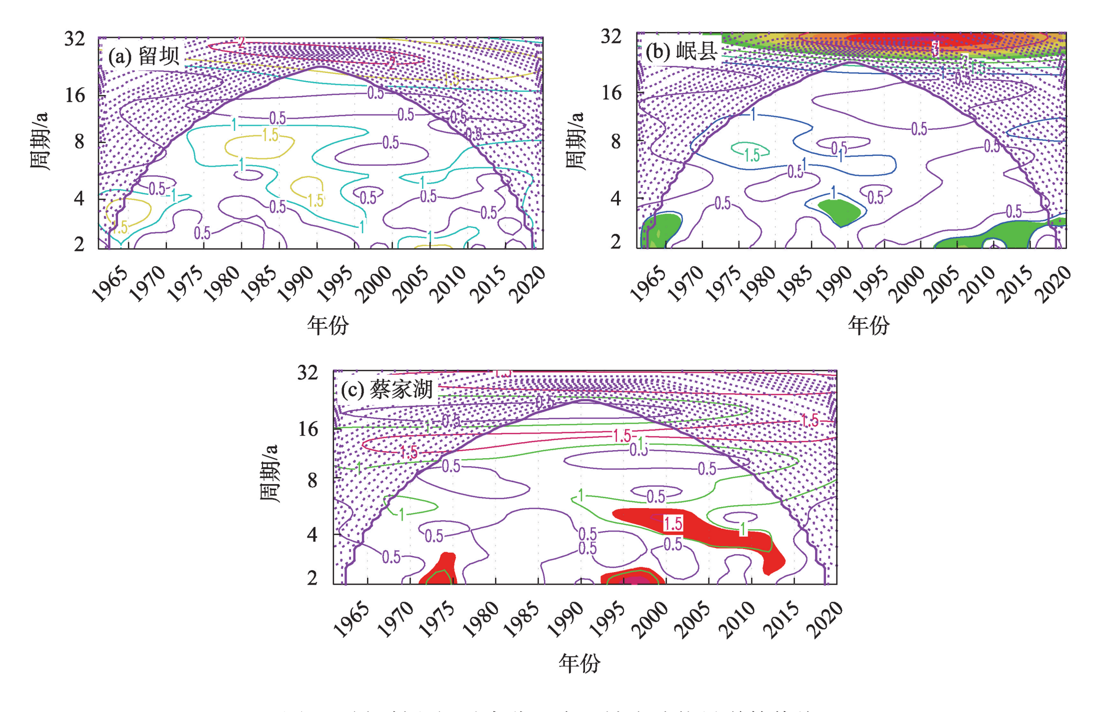


图7 总辐射空间异常分型次区域小波能量谱等值线

Fig. 7 Isoline chart of Morlet wavelet energy spectrum for the subregional total radiation of spatial abnormity typing

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

1966年和2005—2020年的时域内振荡较强;同时还存在3~4 a周期振荡,该振荡在1985—1991年的时域内振荡较强。总辐射也存在4个高低交替:1961—1980年总辐射总体偏高,1981—1995年总辐射处于偏低阶段,1996—2008年总辐射又处于偏高期,2009—2020年总辐射处于偏低阶段。

"西北西部异常型"区域代表站蔡家湖镇近60 a总辐射也存在显著的2~3 a周期振荡特征(图6c),该周期在1972—1976年和1993—2000年的时域内振荡较强;同时还存在4~5 a周期振荡,该振荡在1993—2013年的时域内振荡较强。总辐射同样存在4个高低交替:1961—1983年总辐射总体偏高,1984—1994年总辐射处于偏低阶段,1995—2013年总辐射又处于偏高期,2014—2020年总辐射处于偏低阶段。

由此可见,西北近60 a总辐射"西北东部异常型"周期振荡规律不明显;"西北中部异常型"区域以2~3 a周期振荡和3~4 a周期振荡为主;"西北西部异常型"以2~3 a周期振荡和4~5 a周期振荡为主;但总辐射均存在4个高低交替,表现为20世纪60—70年度偏高,80—90年代初总辐射偏低;90年代后期到21世纪初总辐射偏高,之后偏低的特征。

3 讨 论

本文应用EOF和REOF分析方法,研究了西北太阳总辐射空间分布特征和时域变化,进而论述了次区域时空演变特征。

研究表明,青海的柴达木盆地和甘肃西部为太阳能资源最丰富区。之前也有学者利用西北地区1958—2008年[14]、1961—2003年资料[20]分析也得到相近结论,即青海北部及青海、甘肃和新疆三省区交界地带为太阳能资源最丰富区且资源稳定。总辐射受到天文、物理、地理和气象等因素的影响[21,31],造成西北区域总辐射差异的主导因子是气象要素[20],包括云量、相对湿度、降水量、降水日数和沙尘气溶胶等。青海的柴达木盆地和甘肃西部与新疆接壤的地区降水稀少、相对湿度低、云量少,故该区域是到达地面太阳总辐射高值区,太阳能资源最丰富;而陕西南部、甘肃东南部地区降水丰富、相对湿度大、云量多,到达地面太阳总辐射量远低于西北其他地区,太阳能资源也就低于其他地区。

1961—2020年西北地区除小范围区域总辐射呈上升趋势外,大部分区域总辐射呈下降趋势,这一结论与周扬等[14]、陈少勇等[20]的研究结果一致。导致太阳辐射减少的因素十分复杂,目前的研究认为,工业化进程导致全球气候变暖,使得城市空气污染增加、大气气溶胶相应增加、垂直能见度降低,这些变化是影响太阳总辐射变化的重要因素[6-7];另外,20世纪90年代中期以来,西北地区暖湿化特征明显,西北区域气温升高的同时降水量显著增加,尤其是西北西部暖湿化特征尤为显著[32-35],这也是导致该区域到达地面太阳总辐射减少的可能原因之一。

4 结 论

(1) 1991—2020年近30 a中国西北总辐射气候平均值为5771.4 MJ·m^{-2},总辐射气候平均最大值6564.0 MJ·m^{-2},气候平均最小值4538.0 MJ·m^{-2},其余各地介于其间。年平均总辐射近60 a与近30 a分布特征相比较,总辐射高值区域明显缩小,而低值区域变化不大。青海的柴达木盆地和甘肃西部为太阳能资源最丰富区,陕西南部和甘肃东南部的较小区域为资源丰富区,其余大面积区域均为资源很丰富区。1961—2020年除新疆西南部、甘肃和新疆接壤区、甘肃北部和陕西北部的小范围区域总辐射呈上升趋势外,西北大部分区域总辐射呈下降趋势,且大部分区域趋势系数$r\leqslant-0.26$($P\leqslant0.05$),通过显著性检验。

(2) 西北总辐射振荡强度由西向东逐渐增强。西北地区总辐射EOF第一模态特征向量场表明,总辐射振荡强度由西向东加强,各分量高载荷区主要集中于中东部,该区域是这种空间分异类型中总辐射易出现异常、振荡强度大且敏感的地区。EOF第二模态特征向量场自西向东呈双偶极子型;青海全境和甘肃大部为正值区域,也是总辐射异常振荡最强的区域。

(3) 依据REOF特征向量不同模态空间分异结构类型,可将西北总辐射研究区域划分为3个次区域:即主要受东亚季风影响的"西北东部异常型";其次是受东亚季风影响边缘区的"西北中部异常型"。其三是主要受西风带影响的"西北西部异常型"。

(4) 各次区域总辐射变化特征有所不同。"西北

ChinaXiv:202308.00250v1

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202308.00250v1

东部异常型”总辐射呈减少趋势，总辐射减少的突变点在1973年，时域振荡特征不显著；“西北中部异常型”总辐射也呈减少趋势，总辐射减少突变点在2017年，时域振荡以2~3 a周期振荡和3~4 a周期振荡为主。“西北西部异常型”总辐射亦呈减少趋势，总辐射减少突变点在2008年，时域振荡分别以2~3 a和4~5 a周期振荡为主。

参考文献(References)：

[1] Timilsina G R, Kurdgelashvili L, Narbel P A. A review of solar energy: Markets, economics and policies [J]. Policy Research Working Paper Series, 2011, 16(1): 123-129.

[2] Wilberforce T, Baroutaji A, El H Z, et al. Prospects and challenges of concentrated solar photovoltaics and enhanced geothermal energy technologies[J]. Science of the Total Environment, 2019, 659: 851-861.

[3] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group Ⅰ to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021.

[4] Watson R T, Albritton D L, Barker T, et al. Climate Change 2001: Synthes is Report：A Contribution of Working Groups Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Canbridge: Cambridge University Press, 2002: 398.

[5] 周天军, 陈晓龙. 气候敏感度、气候反馈过程与2 ℃升温阈值的不确定性问题[J]. 气象学报, 2015, 73(4): 624-634. [Zhou Tianjun, Chen Xiaolong. The uncertainty in the 2 ℃ warming threshold issue as related to climate sensitivity and climate feedback[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(4): 624-634.]

[6] Ren J, Lei X H, Zhang Y H, et al. Sunshine duration variability in Haihe River Basin,China during 1966-2015[J]. Water, 2017, 9(10): 770.

[7] Song Z Y, Chen L T, Wang Y J, et al. Effects of urbanization on the decrease in sunshine duration over eastern China[J]. Urban climate, 2019, 28: 100471.

[8] Tang W J, Yang K, Qin J, et al. First effort for constructing a direct solar radiation data set in China for solar energy applications[J]. Journal of Geophysical Research- Atmospheres, 2018, 123(3): 1724-1734.

[9] 陶苏林, 戚易明, 申双和, 等. 中国1981－2014年太阳总辐射的时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 143-147. [Tao Suling, Qi Yiming, Shen Shuanghe, et al. The spatial and temporal variation of solar radiation over China from 1981 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 143-147.]

[10] 李小军, 辛晓洲, 彭志晴. 2003—2012年中国地表太阳辐射时空变化及其影响因子[J]. 太阳能学报, 2017, 38(11): 3057-3066. [Li Xiaojun, Xin Xiaozhou, Peng Zhiqing. Change analysis of surface solar radiation in China from 2003 to 2012[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(11): 3057-3066.]

[11] 杜军, 高佳佳, 次旺顿珠. 1971—2019年羌塘国家级自然保护区日照时数变化特征及其影响因素[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 287-295. [Du Jun, Gao Jiajia, Ciwangdunzhu. Spatio-temporal change of sunshine duration and its influence factors in Changtang nature reserve of Tibet from 1971 to 2019[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(2): 287-295.]

[12] 刘淳, 任立清, 李学军, 等. 1990—2019年中国北方沙区太阳能资源评估[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1213-1223. [Liu Chun, Ren Liqing, Li Xuejun, et al. Evaluation to the solar energy resources in the sandy regions of Northern China from 1990 to 2019[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1213-1223.]

[13] 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 481-492. [Lang Yulian, Shen Yanbo, Bai Long, et al. Assessment of solar energy resources and its exploitation potential in South China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(4): 481-492.]

[14] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 112-123. [Zhou Yang, Wu Wenxiang, Hu Ying, et al. The temporal-spatial distribution and evaluation of potential solar energy resources in Northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 112-123.]

[15] 申彦波, 程兴宏, 赵东. 气象与太阳能生态城[M]. 北京: 气象出版社, 2013. [Shen Yanbo, Cheng Xinghong, Zhao Dong. Weather and Solar Eco-City[M]. Beijing: Meteorological Press, 2013.]

[16] 刘佳, 何清, 刘蕊, 等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 61-66. [Liu Jia, He Qing, Liu Rui, et al. The characteristics of solar radiation and solar resources in Xinjiang[J]. Journal of Arid Meteorology, 2008, 26(4): 61-66.]

[17] 韩世涛, 刘玉兰, 刘娟, 等. 宁夏太阳能资源评估分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 131-135. [Han Shitao, Liu Yulan, Liu Juan, et al. Evaluation analysis on solar energy resources in Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 131-135.]

[18] 朱飙, 李春华, 方锋. 甘肃省太阳能资源评估[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 217-221. [Zhu Biao, Li Chunhua, Fang Feng. Solar energy resource assessment in Gansu Province[J]. Arid Meteorology, 2010, 28(2): 217-221.]

[19] 胡亚男, 李兴华, 郝玉珠. 内蒙古太阳能资源时空分布特征与评估研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 132-138. [Hu Yanan, Li Xinghua, Hao Yuzhu. Spatiotemporal distribution characteristics and evaluation of solar energy resources in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(12): 132-138.]

[20] 陈少勇, 邢晓宾, 张康林, 等. 中国西北地区太阳总辐射的气候

ChinaXiv合作期刊

ChinaXiv:202308.00250v1

特征[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1444-1451. [Chen Shaoyong, Xing Xiaobin, Zhang Kanglin, et al. Climatic characteristics of gross solar radiation over Northwestern China[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1444-1451.]

[21] 姚玉璧, 郑绍忠 ,杨扬, 等. 中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 524-535. [Yao Yubi, Zheng Shaozhong, Yang Yang, et al. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(10): 524-535.]

[22] 杨羡敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 243-248. [Yang Xianmin, Zeng Yan, Qiu Xinfa, et al. The climatic change of global solar radiation over the Yellow river basin during1960 - 2000[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(2): 243-248.]

[23] 吴霞, 姜志伟, 蒙荣, 等. 河套平原太阳辐射变化特征及其与气象要素的相互影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 41-53. [Wu Xia, Jiang Zhiwei, Meng Rong, et al. Variation characteristics of solar radiation and the interaction with meteorological elements in the Hetao Plain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 41-53.]

[24] 齐月, 房世波, 周文佐. 近50年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布[J]. 生态学报, 2014, 34(24): 7444-7453. [Qi Yue, Fang Shibo, Zhou Wenzuo. The changes and spatial distribution of ground solar radiation in China in the past 50 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7444-7453.]

[25] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Zhang Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980-989.]

[26] 申彦波, 王香云, 章毅之, 等. 太阳能资源评估方法 GB/T 37526-2019[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019. [Shen Yanbo, Wang Xiangyun, Zhang Yizhi, et al. Assessment Method for Solar Energy Resource GB/T 37526-2019[S]. Beijing: Standardization Administration of China, 2019.]

[27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 36-69. [Wei Fengying. Climatological Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 36-69.]

[28] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 33-244. [Wu Hongbao, Wu Lei. Diagnosis and Prediction Methods of Climate Variability[M]. Beijing: Meteorological Press, 2005: 33-244.]

[29] 徐栋夫, 李栋梁, 王慧. 我国西南地区秋季干湿分类及主要类型异常年环流特征分析[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 373-385. [Xu Dongfu, Li Dongliang, Wang Hui. Autumn dry-wet conditions and main types of atmospheric circulationin anomalous years in Southwest China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 38(2): 373-385.]

[30] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. Monthly Weather Review, 1982: 110: 699-706.

[31] 孙卫国. 气候资源学[M]. 北京 : 气象出版社, 2008: 123-150. [Sun Weiguo. Science of Climatic Resources[M]. Beijing: Meteorological Press, 2008: 123-150.]

[32] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1184-1828. [Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1184-1828.]

[33] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333-346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961-2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333-346.]

[34] 卢宝宝, 孙慧兰, 姜泉泉, 等. 近53 a新疆水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1579-1589. [Lu Baobao, Sun Huilan, Jiang Quanquan, et al. Spatiotemporal variation characteristics of the water budget in Xinjiang during the latest 53 years[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1579-1589.]

[35] 闫昕旸, 张强, 张文波, 等. 泛中亚干旱区气候变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 1-11. [Yan Xinyang, Zhang Qiang, Zhang Wenbo, et al. Analysis of climate characteristics in the Pan-Central-Asia arid region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 1-11.]

ChinaXiv合作期刊

Anomaly temporal-spatial distribution of solar radiation in Northwest China

YAO Yubi[1,2], ZHENG Shaozhong[1], DONG Hongchang[3], SHI Jie[3], ZHANG Min[1], XIA Quan[1]

(1. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Yellow River Basin Ecotope Integration of Industry and Education Research Institute, Key Laboratory of Climate Resources Utilization and Disaster Prevention and Mitigation of Gansu Province, Lanzhou 730021, Gansu, China; 2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology under China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, Gansu, China; 3. Meteorological Bureau of Dingxi of Gansu Province, Dingxi 743000, Gansu, China)

Abstract: The temporal variation, spatial distribution, and temporal and spatial evolution characteristics of the total radiation in Northwest China were studied using meteorological observation data from 169 national meteorological stations in Northwest China, over the past 60 years. The Qaidam Basin in the Northwest of Qinghai and the west of Gansu were the most abundant areas for solar energy resources, the smaller areas in the south of Shaanxi and the southeast of Gansu were found to be resource rich areas, and the other large areas are resource rich areas. From 1961 to 2020, the total radiation showed an upward trend in Southwest Xinjiang, the border area between Gansu and Xinjiang, and smaller areas in northern Gansu and northern Shaanxi, while the total radiation showed a downward trend in most regions of Northwest China. The eigenvector field of EOF mode 1 shows that the total radiation oscillation intensifies from west to east, and the high load area for each component is mainly concentrated in the middle and east, which is the region where the total radiation is prone to be abnormal and the oscillation is strong and sensitive. The eigenvector field of the second EOF mode presents a dipole type from west to east. Qinghai and most of the Gansu are positive regions, which are also the regions with the strongest total radiation and abnormal oscillation. According to the different modal spatial differentiation structure types for the REOF eigenvectors, the study area can be divided into three sub regions, namely: “Eastern northwest anomaly type” which is affected by the East Asian monsoon; “Central northwest anomaly type” which is the marginal region and mainly affected by the East Asian monsoon; and “Western Northwest anomaly type” which is mainly affected by the westerlies. The mutation points for total radiation reduction in the three subregions occurred in 1973, 2017, and 2008 respectively.

Keywords: total radiation; spatial anomaly typing; subregional changes; Northwest China

ChinaXiv:202308.00250v1